

ナノビーム方式においてクラブ・ウエストの導入を含めた SuperKEKB 加速器の最近の運転状況

HIGHLIGHTS FROM SuperKEKB COMMISSIONING FOR EARLY STAGE OF NANO-BEAM SCHEME AND CRAB WAIST SCHEME

大西幸喜*

Yukiyoshi Ohnishi*

on behalf of the SuperKEKB Accelerator Group and Belle II Group
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The SuperKEKB electron-positron collider is being commissioned at KEK to study a new physics in the B-meson decays. The target luminosity is 40 times of the highest luminosity record at KEKB, $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. We have applied a novel “nano-beam scheme” to squeeze the beta function at the interaction point (IP) down to 1 mm in the vertical, 60 mm in the HER and 80 mm in the LER in the horizontal direction, respectively, for the most operation of Spring run 2020. We have tested 0.8 mm for the vertical beta function at the IP (β_y^*) in both rings for the last week of Spring run 2020. The beta function at the IP is the smallest value for the existing circular colliders in the world. However, the design β_y^* is 0.3 mm which is about 1/3 of the achievement. The vertical beam size is also the smallest value compared with the former world record at the SLC. Recently, we also applied a “crab waist scheme” proposed by P. Raimondi et al. to improve the luminosity performance. We present the early stage of the commissioning of the nano-beam scheme as well as the crab waist scheme in Autumn run 2019 and Spring run 2020.

1. はじめに

2019年3月11日から開始されたフェーズ3についての名称が変更された。1年のうち、春期と秋期の2回に分て運転が行われる。1月から3月までを“a”、4月から7月までを“b”、10月から12月までを“c”と区分する。通常、運転経費が不足しないかぎり、日本の会計年度末と年度始めは連続して運転が行われるので、春期運転は“a/b”となる。2019a/bの運転報告は、昨年第16回日本加速器学会年會にて報告されている[1]。本稿では、2019cおよび2020a/bの運転報告を行う。

2020a/bでは、 $2.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ という世界最高ルミノシティを達成した。また、衝突点における垂直方向のビームサイズも $0.22 \mu\text{m}$ と世界最小である。¹ 衝突点における垂直ベータ関数は、1 mm から $800 \mu\text{m}$ まで絞ることに成功している。SuperKEKB 加速器は、衝突点ベータ関数が mm 領域から μm 領域に突入した世界で初めての衝突型加速器である。Figure 1に、衝突点における垂直ベータ関数の歴史を示す。

2. ナノビーム方式

衝突型加速器のルミノシティ性能は、基本的にビーム電流、衝突点における垂直ベータ関数 (β_y^*)、ビームビーム相互作用の限界値で決められる。SuperKEKBより古い加速器では、衝突点ベータ関数をバンチ長より小さくしても後で述べる幾何学的な効果によって、効率よくルミノシティを高めることが困難であった。この問題を新しい手法によって克服したの

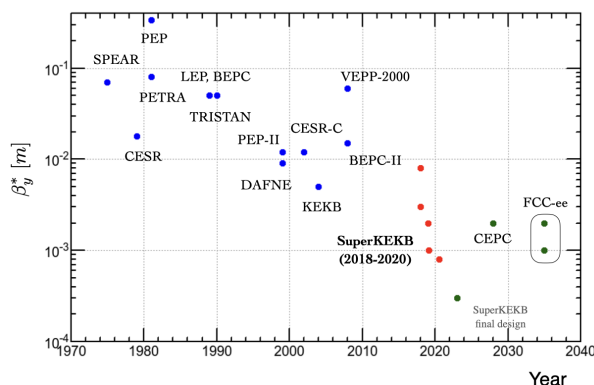


Figure 1: History of the vertical beta function at the IP for the various colliders in the world.

が、ナノビーム方式である[3]。ナノビーム方式においてルミノシティは、バンチ内粒子数 N_{\pm} 、バンチ数 n_b 、周回周波数 f_0 を用いて、

$$L = \frac{N_+ N_- n_b f_0}{2\pi \Sigma_x^* \Sigma_y^*} = \frac{N_+ N_- n_b f_0}{2\pi \phi_x \sqrt{\sigma_{z+}^2 + \sigma_{z-}^2 - \sqrt{\varepsilon_{y+} \beta_{y+}^* + \varepsilon_{y-} \beta_{y-}^*}}}, \quad (1)$$

と書くことができる。 ϕ_x は半交差角であり、

$$\Sigma_x^* = \sqrt{\sigma_{x+}^{*2} + \sigma_{z+}^2 \tan^2 \phi_x + \sigma_{x-}^{*2} + \sigma_{z-}^2 \tan^2 \phi_x} = \sqrt{\sigma_{x+}^{*2} (1 + \Psi_+^2) + \sigma_{x-}^{*2} (1 + \Psi_-^2)} \quad (2)$$

である。通常の正面衝突や交差角度が小さい衝突方式の場合、Piwinski角と呼ばれる Ψ の値は1以下と

* yukiyoshi.onishi@kek.jp

¹ これまでの最小ビームサイズは、SLCの $0.7 \mu\text{m}$ [2].

なり無視されるが、ナノビーム方式の場合、 $O(10)$ と大きくなるため衝突点における水平ビームサイズを無視することができる。ルミノシティは、Eq. (1)となり、パンチ長(σ_z)が式に入るので、その幾何学的なルミノシティ損失を補填するために、垂直エミッタンスを小さくすることが要求される。

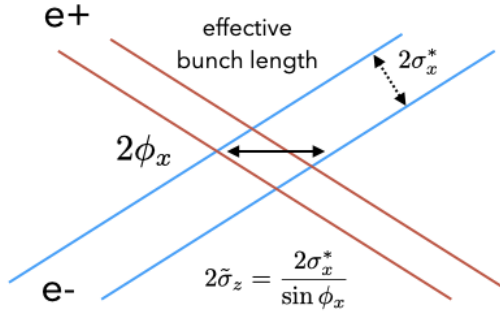


Figure 2: The schematic top view of nano-beam scheme.

Figure 2に、ナノビーム方式における2つのビームが衝突する様子を示す。ベータ関数はビームの進行方向に沿って衝突点から離れるにつれて急激に大きくなる。このため、通常の衝突方式では、 β_y^* をパンチ長より小さく絞っても、ルミノシティを効率良く高くすることができない。これは「砂時計効果」と呼ばれる。ナノビーム方式では、衝突領域は2つのビームの重なった領域 (effective bunch length、 $\tilde{\sigma}_z$)に限定されるため、ベータ関数の小さな領域のみで粒子は衝突する。したがって、砂時計効果を避けるための条件は、

$$\beta_y^* > \tilde{\sigma}_z = \frac{\sigma_x^*}{\phi_x} = \frac{\sigma_z}{\Psi} \quad (3)$$

と変更される。具体的な数字で示すと、パンチ長が6 mmでPiwinski角が20の場合、300 μm まで β_y^* を絞ることが原理的に可能である。インピーダンスの影響によりパンチ電流の増加とともにパンチ長が延びる効果に注意する必要がある。また、 β_y^* を無限に小さく絞れば、ルミノシティを無限大にできるかと言うと、それほど単純ではないことも明記しておきたい。

本稿で用いるスペシフィックルミノシティとビームビームパラメータの定義を以下に示す。

$$L_{sp} = \frac{L}{I_{b+}I_{b-}n_b} = \frac{1}{2\pi e^2 f_0 \phi_x \Sigma_z \Sigma_y} \quad (4)$$

$$\xi_{y\pm} = \frac{2er_e\beta_{y\pm}^* L}{\gamma_{\pm} I_{\pm}}, \quad (5)$$

$I_{b\pm}$ は、パンチ電流である。

3. クラブウエスト

クラブウエストを導入する目的は、ウエストのずれた場所で衝突する粒子を極力減らすことである。

ウエストは、粒子密度が最も高くなるビームラインに沿った進行方向の位置である。ビーム力学的には、ビームビーム相互作用に起因する共鳴線を減少させたりビームテイルを抑制する働きが期待される。ナノビーム方式の場合、衝突点に、次のハミルトニアンを作ることができれば、水平方向の振幅に依存してウエストを変化させることができる。

$$H_{cw} = -\frac{1}{2 \tan 2\phi_x} x^* p_y^{*2} \quad (6)$$

一方、6極磁石が作るハミルトニアンを、衝突点に転送すると

$$H_{cw} = -\frac{K_2}{2} \beta_y^s \beta_y^* \sqrt{\frac{\beta_x^s}{\beta_x^*}} \cos \Delta\psi_x \sin^2 \Delta\psi_y x^* p_y^{*2} \quad (7)$$

となる。したがって、6極磁石と衝突点との位相差、6極磁石におけるベータ関数と磁場を調整することができれば、クラブウエストを実現させることができる[4,5]。 K_2 を調整することによって、クラブウエストを0%から100%まで効果を変化させることができ、これをクラブウエスト比率と定義する。Figure 3に、クラブウエストの概念図を示す。

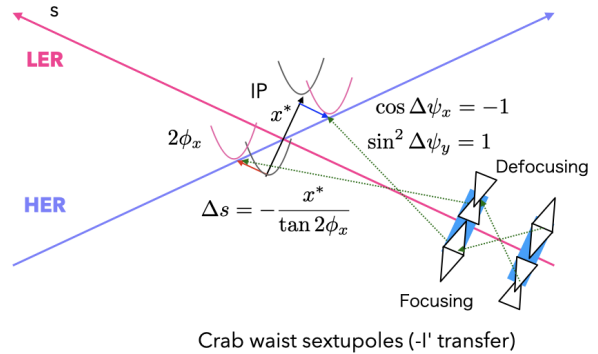


Figure 3: The schematic top view of crab waist scheme. The crab waist sextupoles are located at each side of the IP. The figure shows only one side for the IP.

衝突点でリング内側の粒子は6極磁石(衝突点に近い)ではリング外側に位置するので、4極成分により発散作用を受けてウエストは元の場所から変位に比例して遠ざかり、完全なクラブウエストでは相手のビームライン上に移動する。逆に、衝突点でリング外側の粒子は収束作用を受けてウエストは元の場所から変位に比例して近づく。SuperKEKB加速器では、クラブウエスト用6極磁石として、局所的色収差補正のための強い6極磁石を利用する。垂直方向の局所的色収差補正は、衝突点の両側のそれぞれで、同じ磁場強度の6極磁石2台から構成され $-l'$ の転送行列で結ばれていたが、電源を独立化する改造を施し、磁場について互いに強弱関係をつける。こうすることによって、色収差を補正しつつクラブウエストを実現することができる。

4. 運転概要

4.1 2019年10月15日～2019年12月12日(2019c)

3ヶ月半の夏のシャットダウンを経て、2019年10月15日より2019cの運転が開始された。立ち上げ調整運転後の10月17日よりLERとHERの両リングともに真空焼き出し運転を開始した。調整運転および真空焼き出し運転で用いるオプティクスはデチューンド・オプティクス(HERは $\beta_x^*=400$ mm、 $\beta_y^*=81$ mm、LERは $\beta_x^*=384$ mm、 $\beta_y^*=48.6$ mm)である。10月19日までに700 mAでの真空焼き出しが可能となった。10月21日にNEGの活性化を行い、両リングの運転を再開しようとしたところ、陽電子ビーム輸送路の偏向磁石(BHIP.6)の上下コイルの渡り接続部が加熱損傷によって破損し運転が不可能となった。破損した偏向磁石については予備機と交換することとなり、電磁石の交換には4日間を要した。

10月25日にMR運転を再開し、10月28日にHERの衝突点ベータ関数を絞ることを試み、 β_y^* を2 mmまで絞った。翌10月29日に、LERの β_y^* をHERと同様に絞った。ベータ関数を絞った後、衝突調整を行い物理ランを開始した。バンチ数743、LERのビーム電流154 mA、HERのビーム電流90 mAで、 3.5×10^{33} cm⁻²s⁻¹のルミノシティを達成した。10月31日までに、可動コリメータの調整、連続入射モード(トップアップ入射)を確立し、さらなる衝突調整を行うことによって、ルミノシティは 6×10^{33} cm⁻²s⁻¹まで向上した。10月31日のメンテナンス後の立ち上げ途中、陽電子ダンピングリングの出射セプタムの電源異常によりLER入射が不可能となった。11月3日に陽電子ダンピングリングの出射セプタム電源が復旧したが、復旧に4日間を費すこととなった。この間に入射器のRF電子銃で用いられている加速管

のコンディショニング、HERのオプティクス補正等を行った。11月7日に、 β_y^* を1.5 mmまで絞る試験を行った。その後の物理ランでは、2 mmの β_y^* に戻し、795バンチ、LERのビーム電流440 mA、HERのビーム電流372 mAで、最高ルミノシティ 6.85×10^{33} cm⁻²s⁻¹を達成した。11月11日から再び、 β_y^* を1.5 mm、1.2 mmと絞り、11月18日には、1.0 mmまで絞ることに成功した($\beta_x^*=80$ mm)。

12月2日から、日中および準夜シフトは高ビーム電流スタディを行い、早朝シフトは物理ランを行った。12月4日に、HERの β_x^* を80 mmから60 mmに絞った。これは、HERにコヒーレントビームビーム(ヘッドテイル)不安定性が観測されたためである。最終的には、1467バンチ、LERのビーム電流819 mA、HERのビーム電流640 mAで、 1.88×10^{34} cm⁻²s⁻¹のルミノシティに到達した。ただし、物理ランではなく、Belle II測定器による物理データの取得なしという条件である。物理ランでの最高ルミノシティは、 1.14×10^{34} cm⁻²s⁻¹(783バンチ、LERのビーム電流467 mA、HERのビーム電流388 mA)である。12月12日に冬期シャットダウンに入った。

4.2 2020年2月25日～2020年7月1日(2020a/b)

2月25日よりLERの運転を開始した。まず、デチューンドオプティクスで調整運転および真空焼き出しを行った。LERの真空焼き出しは、ビーム電流400 mA～500 mAで3月2日のHER立ち上げまで続けられた。2月28日に、 β_y^* を2 mmまで、 β_x^* を80 mmまで絞った。3月2日にHERを立ち上げ、デチューンドオプティクスで調整運転を行い、 β_y^* を2 mmまで、 β_x^* を80 mmまで絞った。

3月6日から、783バンチ、LERのビーム電流240 mA、HERのビーム電流140 mAというパラメータで

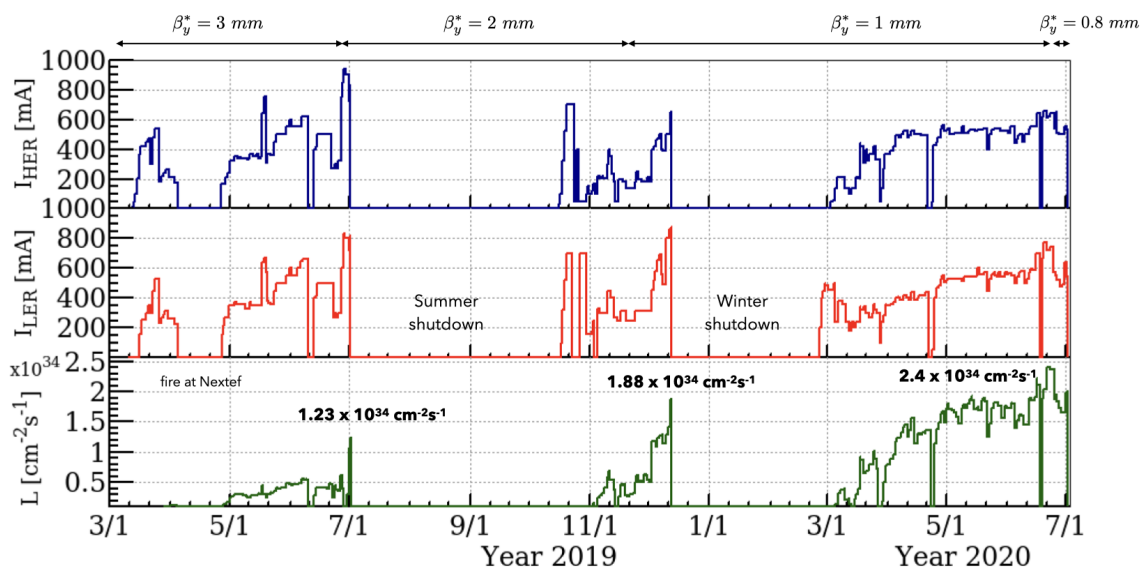


Figure 4: Operation history from Spring run 2019 to Spring run 2020. The beam currents in the HER(top), in the LER(middle), and the peak luminosity in a day(bottom).

物理ランを開始した。3月9日には、 β_y^* を1mmまで両リングとも絞った。LERは $\beta_x^*=80$ mm、HERは $\beta_x^*=60$ mmとした。3月16日には、世界初となる本格的なクラブウエストをLERに導入した。クラブウエスト比率は40%である。3月20日に東京電力株式会社による工事の影響で電力制限が行われたためMR運転を1日中断し、復電後は物理ランを継続した。3月24日に、LERのクラブウエスト比率を60%に増加した。4月14日にLERのウイグラー電磁石電源の1台(BWDNRP_26)が故障し、その復旧に1日を要した。HERにもクラブウエストを導入することが決定されたので、4月21日から4月23日にかけて1台の電源で2台の6極磁石を励磁していたが、それぞれ独立電源とする改造が施された。4月24日にHERのクラブウエスト比率を40%に設定しビーム光学補正を行った。物理ランでは、概ね500mAのビーム電流で、バンチ数は783という設定で運転を行った。5月11日から5月14日、および6月10日から6月17日の2回について、重心系のエネルギーを $\Upsilon(4S)$ 共鳴状態から60MeV下げたところで物理ランを行っている。

5月21日には、LERのTouschek効果を軽減するために、水平エミッタンスを1.6nmから4nmに変更した。ここでは、NIKKO直線部にあるウイグラー部に水平分散を作り出すことによって水平エミッタンスを調整している。6月1日に、LERのクラブウエスト比率を80%まで増加させている。6月上旬に、LERにおいて回転6極電磁石を用いたX-Y結合の色収差補正が試された。これには、衝突点に近い24台の6極磁石が用いられ、台座が回転することによって歪6極成分と6極成分をつくり出す。また、速い衝突軌道フィードバックシステム(Fast iBump Feedback System)も導入された。これは、ビームビームキック量に基づいて、33kHzの繰り返しで衝突点の軌道を維持する仕組みである。6月16日に、D02区画にある冷却水ポンプの地絡故障により、その区画に設置されていた電源が遮断され、QCSクエンチおよび電磁石の磁場が落されるトラブルが起こった。この復旧には約1日を要した。

6月23日に、さらに両リングの β_y^* を800 μm 、 β_x^* を60mmに絞ることに成功し、物理ランを行った。LERの入射に同期したルミノシティ低下が以前から観測されていたが、最近になって入射点付近のX-Y結合によって水平方向の入射振幅が垂直方向に回り込むことがわかってきた。これを補正するために永久磁石で作られた歪4極磁石を入射点に設置して調整を行ったところ、垂直振動が減少しルミノシティの減少が抑制された。2020a/bでは、LERで712mA、HERで607mAのビーム電流において、 $2.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを記録した。これは物理ラン(測定器がデータ取得中)での記録であり、KEKB加速器の $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ およびLHCの $2.14 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を越える世界最高ルミノシティである。7月1日に、夏期シャットダウンに入った。ビーム電流とルミノシティの推移を、Fig. 4に示す。

5. 2019cおよび2020a/bの到達点

5.1 衝突点ベータ関数、ビーム電流、ルミノシティ

衝突点ベータ関数の最小値、ビーム電流およびルミノシティの最高値(物理ラン中)をTable 1に示す。表には、それぞれの運転期間における運転日数が示されており、その運転期間における最大ビーム電流、 $\beta_{x,y}^*$ の最小値と最高ルミノシティは必ずしも対応していない。2018年のフェーズ2コミッションングから、2年5ヵ月間の記録である。物理ランにおけるルミノシティの向上を見ると、運転期間ごと倍に増加していることがわかる。しかしながら、最高ビーム電流は、あまり増加していない。これは、主に β_y^* を絞ることによって、ルミノシティを増加させてきたことを示している。

Table 1: Operation period, beta function at the IP, beam currents, and luminosity. Left side for LER and right for HER to indicate β_x^* and beam currents. The unit of luminosity is 10^{34} .

	2018a/b	2019a/b	2019c	2020a/b
Start	Mar. 19	Mar. 11	Oct. 15	Feb. 25
End	Jul. 17	Jul. 1	Dec. 12	Jul. 1
Period (days)	120	91	57	127
β_x^* (mm)	200/100	80/80	80/60	60/60
β_y^* (mm)	3	2	1	0.8
I (mA)	860/800	940/840	880/700	770/660
L ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.26	0.55	1.14	2.40

Table 2に、2020a/bにおける典型的なマシン・パラメータを示す。 β_y^* は、1mmと0.8mmの場合について示してある。

Table 2: Machine parameters in Spring run 2020a/b.

	LER / HER	LER / HER	Unit
ϵ_x	4.0 / 4.6	4.0 / 4.6	nm
β_x^*	80 / 60	60 / 60	mm
β_y^*	1	0.8	mm
I	712 / 607	536 / 530	mA
n_b	978	978	
I_b	0.728 / 0.621	0.548 / 0.542	mA
lifetime	760 / 1270	600 / 1177	sec
σ_x^*	17.9 / 16.6	15.5 / 16.6	μm
σ_y^*	0.285	0.224	μm
CW ratio	80 / 40	80 / 40	%
ξ_y	0.039 / 0.026	0.035 / 0.020	
L_{sp}	5.4×10^{31}	6.9×10^{31}	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1} / \text{mA}^2$
L	2.4×10^{34}	2.0×10^{34}	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Figure 5に、バンチ電流積を横軸に、縦軸にスペシフィックルミノシティを取ったグラフを示す。 $\beta_y^*=1$

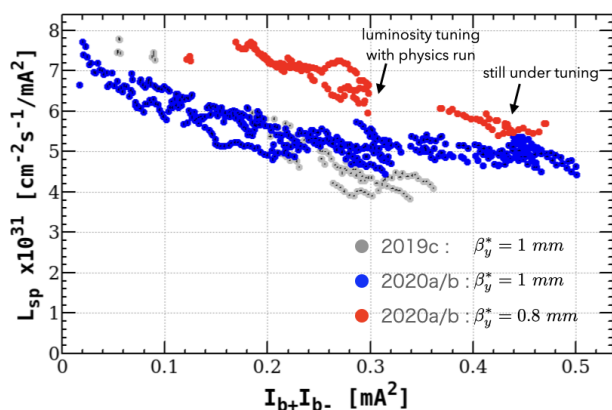


Figure 5: Specific luminosity as a function of bunch current product.

mm の場合について、2019c と比較して 2020a/b のスペシフィック ルミノシティは著しく向上している。特に、 0.3 mA^2 以上の領域でほぼフラットとなっている。これは、クラブウエストの導入および可動コリメータ調整、入射器性能の向上によるものである。 $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$ と 0.8 mm を比較すると、バンチ電流積が 0.3 mA^2 で約 25% スペシフィック ルミノシティが向上している。これは、ベータ関数の逆比となっており、垂直エミッタンスは β_y^* と同じ比率で小さくなっている。ビームビームによるビームブローアップが軽減されていることを示す。ただし、バンチ電流積が 0.4 mA^2 以上の領域では、時間的な制約により $\beta_y^* = 0.8 \text{ mm}$ での衝突調整がまだ不十分であることから、さらなる向上が期待される。

6. 運転統計

SuperKEKB 加速器の運転には、職員が 2 名 (シフトリーダーとコミショニング・シフト)、1 日 3 交替で 24 時間担当している。さらに、業務委託の運転員 2 名が、常時サポートに入って運転およびコミショニングを支援するという体制である。また、Belle II 測定器との連絡と物理ラン調整を行う BCG シフトが 1 名、加速器コントロール室に滞在する。しかしながら、COVID-19 感染拡大の影響を受けて、2020a/b では BCG シフトはリモート参加となり、朝のコミショニングミーティングも基本的にリモートで行うという形式が取られた。加速器コントロール室に集まって、議論しながらコミショニングを進める従来の体制が、ほとんど不可能となった。

2019c と 2020a/b における運転統計を、Table 3 および Table 4 に、それぞれ示す。マシンチューニング (Tuning) は、NEG の活性化、真空焼き出し、磁石の初期化、各種ハードウェアの調整、入射調整、ビーム光学系補正、衝突調整、ビーム・バックグラウンド低減のための可動コリメータ調整、メンテ後の立ち上げなどを含む。長時間マシンを停止した後は、閉軌道を見つけるのに時間がかかる。Others は、メンテナンスとその他の意味である。

Table 3: Operation statistics in Spring run 2019c. The unit in hours.

2019	Physics	Tuning	Study	Troubles	Others
October	10	225	0	152	12
November	335.5	289	0	79.5	16
December	116	145	10	1	1
Total	461.5	659	10	232.5	29
Ratio (%)	33.1	47.3	0.7	16.7	2.1

Table 4: Operation statistics in Spring run 2020a/b. The unit in hours.

2020	Physics	Tuning	Study	Troubles	Others
February	0	102	0	0	10
March	344	314.5	0	17.5	68
April	468	135	0	71.5	45.5
May	525	133.5	0	26	59.5
June	463	153.5	28	50.5	25
July	9	0	0	0	0
Total	1809	838.5	28	165.5	208
Ratio (%)	59.3	27.5	0.9	5.4	6.8

2019c は、約 2 ヶ月の運転時間を、主に加速器調整に充てることを決めていたので、物理ラン (Physics) の運転時間は、約 30% と少ない。トラブル (Troubles) が 16.7% と比較的多かった。2020a/b では、約 60% が物理ランに費されており、トラブルが 5.4% と少ない。全体的に見ると、マシンスタディ (Study) の占める割合は約 1% と低く、マシンチューニングの占める割合が 27.5% と高い。これは、クラブウエストの導入、LER の高エミッタンス化、X-Y 結合の色収差補正などのビーム光学系の調整に時間をかけた結果である。特に、オプティクス測定および補正には、合計で約 200 時間かけており、マシンチューニングの約 1/4 を占めている。

7. まとめと今後の予定

衝突点ベータ関数を最終的には、 $\beta_x^* = 60 \text{ mm}$ 、 $\beta_y^* = 0.8 \text{ mm}$ まで絞って衝突調整を行った。最高ルミノシティは、LER のビーム電流が 712 mA、HER のビーム電流 607 mA の時に、 $2.40 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。この時の衝突点ベータ関数は、LER が $\beta_x^* = 80 \text{ mm}$ 、HER が $\beta_x^* = 60 \text{ mm}$ 、 β_y^* が両リングともに 1 mm である。2020a/b の運転で、得られたルミノシティは、世界最高ルミノシティである。また、衝突点における垂直方向のビームサイズも世界最小である。

夏期長期シャットダウンの後は、2020 年秋期ラン (2020c) として 10 月 19 日から 12 月 18 日までビーム運転を行う予定である。秋期ランでは、今期の 2 倍のルミノシティを目指してコミショニングおよび物理ランを継続することを目指す。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, FSPH008, “SuperKEKB フェーズ 3 コミッショニング”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31- Aug. 3, 2019.
- [2] R. Assmann *et al.*, “SLC- THE END GAME”, Proceedings of 7th European Conference, EPAC2000, Vienna, Austria, June 26-30, 2000.
- [3] Y. Ohnishi *et al.*, WEOLP01, “SuperKEKB フェーズ 2 におけるコミッショニングの成果”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagasaki, Japan, Aug. 7- 10, 2018.
- [4] “SuperB Conceptual Design Report”, INFN/AE-07/2, SLAC-R-856, LAL 07-15, March 2007.
- [5] K. Oide *et al.*, “Beam Optics for FCC-ee Collider Ring”, Proceedings of the 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP), Chicago, USA, Aug. 3-10, 2016.